

УДК 004.94

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.128543

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АВТОМАТУ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ДЛЯ ВЕНДИНГОВИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Сало А. М.

Об'єктом дослідження є автомат очищення води для систем самообслуговування. Потреба в очищеній воді є на мийках самообслуговування, водоматах, кавоматах, тощо. Як правило, такі системи розміщуються в географічно розпорошених місцях. Одним з найбільш проблемних місць є підбір правильної конфігурації автомату під місце розташування. Іншим проблемним місцем є високі витрати на обслуговування. Більшість існуючих автоматів очищення води, які сьогодні виробляються, не мають в своєму складі системи моніторингу, що виливається в неефективну роботу сервісної служби. Названі проблеми призводять до зменшення кількості користувачів систем самообслуговування.

Для вирішення згаданих проблем пропонується проектувати автомат очищення води, який буде працювати в складі 5-ти рівневої вендингової кіберфізичної системи.

Описано структуру та принципи роботи автомату очищення води на базі мембрани зворотного осмосу. В ході дослідження використовувалися методи імітаційного моделювання Монте-Карло, що дозволило підібрати конфігураційні параметри автомату відповідно до запитів користувачів. Визначено критичні параметри обладнання, які впливають на продуктивність автомату очищення води. За результатами моделювання вибрано дві типові конфігурації автомату на базі мембран TW30-1812-100 та XLE4040.

Додатково програмна модель автомату очищення води інтегрована в аналітичну систему, яка генерує рекомендаційні рішення для сервісного відділу. Аналітична система рекомендує не тільки текучу заміну функціональних вузлів (фільтрів, мембрани), а й здатна прогнозувати потребу в зміні конфігурації автомату. Такий підхід дозволяє оптимізувати маршрути обслуговування та збільшити ефективність роботи сервісної служби.

Ключові слова: вендингова кіберфізична система, імітаційне моделювання, мембрана зворотного осмосу, аналітична система.

1. Вступ

Вендинг (англ. vending) – це продаж товарів та послуг за допомогою автоматизованих систем (торгових автоматів). Торговий автомат (вендинговий автомат) має виконувати такі функції: приймати готівкові та безготівкові гроші; видавати товар або послугу; працювати незалежно від обслуговуючого персоналу

(за винятком заповнення, ремонту, інкасації). Він також додатково (за потребою) може виконувати технологічні (приготування чи технологічна обробка перед видачею) та рекламні функції. Вендингова кіберфізична система (ВКФС) – 5-ти рівнева платформа, яка забезпечує інтеграцію територіально-розподілених вендингових автоматів (ВА) та інформаційних програмно-апаратних комплексів за допомогою телекомунікаційних засобів [1, 2]. Вендингові КФС мають наступні особливості:

- високий рівень взаємодії з людиною (велике значення має простота та зручність використання автомату);
- багаторівнева структура;
- неоднорідність (в основному через різні типи товару чи послуг, які продаються);
- розпорошеність (розміщення вендингових автоматів має велику географію);
- енергоефективність (дозволяє зменшити затрати на експлуатацію, а також збільшити кількість доступних місць для встановлення);
- реальний масштаб часу;
- постійна еволюція та ріст рівня інтелекту (особливо велике значення має для операторів системи, які мають отримувати рекомендації від ВКФС щодо збільшення ефективності експлуатації);
- надвисока складність, здатність діагностувати та рекомендувати виправляти помилки в програмному та апаратному забезпеченні.

Для забезпечення роботи багатьох вендингових автоматів потрібна очищена вода. Технологічна функція очищення води використовується в мийках самообслуговування, кавоматах, водоматах, тощо.

Тому актуальним є дослідження принципів роботи та структури автомату очищення води (АОВ), що працює в складі вендингової кіберфізичної системи.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

На рис. 1 показано 5-ти рівневу платформу вендингової кіберфізичної системи. Об'єктом дослідження є автомат очищення води, який є одним з функціональних блоків, що працює в складі вендингової кіберфізичної системи.

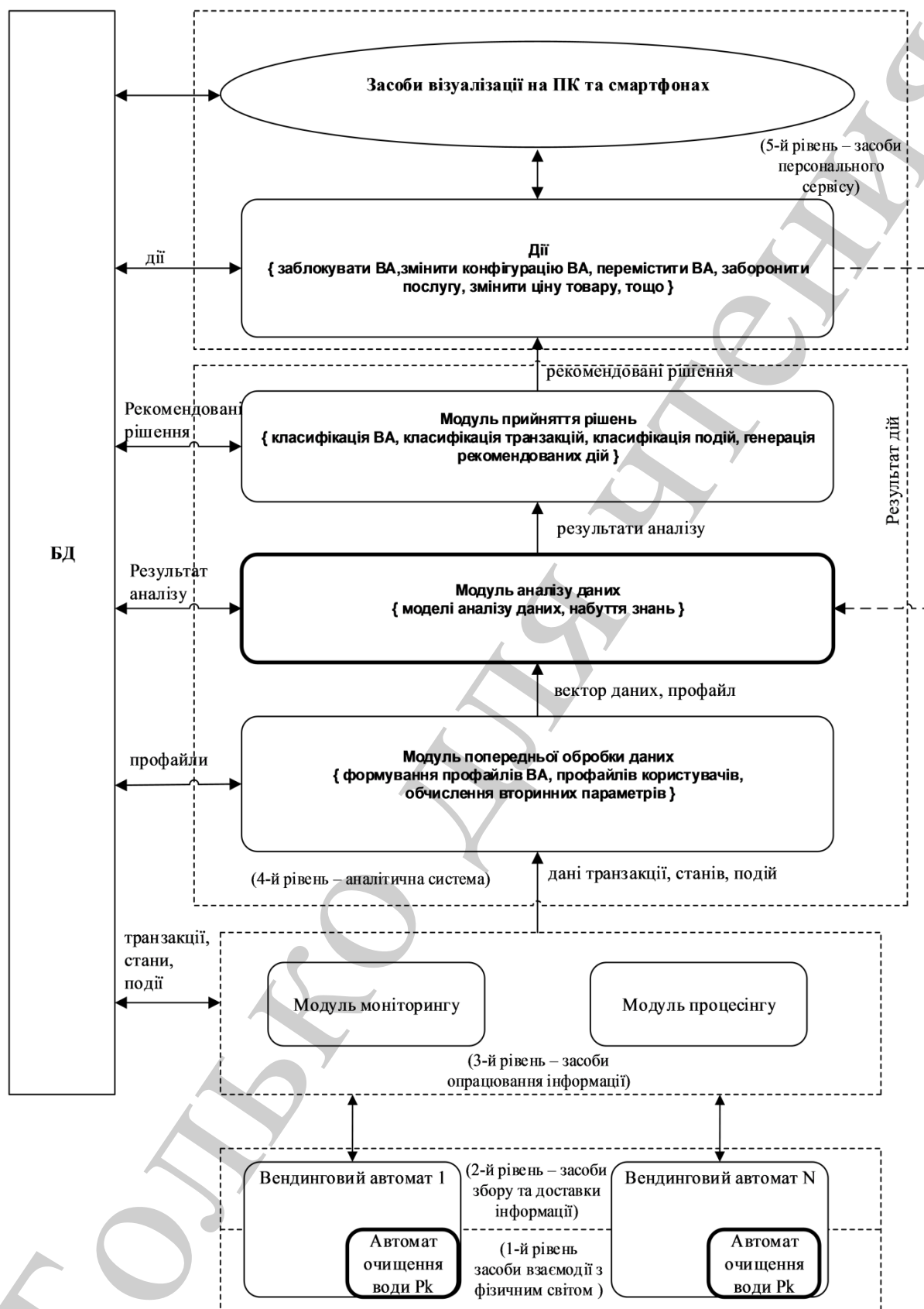


Рис. 1. 5-ти рівнева платформа вендингової кіберфізичної системи

Опишемо загальний процес роботи ВКФС на прикладі мийки самообслуговування. Процес мийки відбувається за наступними етапами:

- Водій оплачує, використовуючи купюроприймач вендингового автомату (платіжного терміналу), за послуги мийки.
- Водій вибирає послугу «Мийка очищеною водою».
- Вендинговий автомат включає системи, що забезпечують подачу очищеної води з накопичувальної ємності на час відповідно до оплаченої суми.
- АОВ починає фільтрацію води, яка подається з центрального водопроводу або свердловини. Очищена вода потрапляє в накопичувальну ємність.
- Вендинговий автомат формує транзакцію (дата і час оплати, сума, об'єм використаної води, час мийки) і через модуль процесінгу дані записуються в базу даних ВКФС.
- Додатково вендинговий автомат відслідковує стан обладнання і через модуль моніторингу записує інформацію в базу даних ВКФС.
- Аналітична система ВКФС, маючи дані про транзакції та технічний стан обладнання, може генерувати рекомендаційні рішення сервісній службі.

На ринку присутні багато різних АОВ. Але одним з найбільш проблемних місць в існуючих на ринку автоматах очищення води є їхня непристосованість до експлуатації в складі ВКФС, що збільшує витрати компаній на експлуатацію. А також зменшується продажі компаній оскільки сервісна служба не може оперативно реагувати на проблеми з якістю води та поломки автоматів.

3. Мета та задачі досліджень

Метою роботи є розробка структурної схеми та моделі автомата очищення води, який буде забезпечувати необхідну продуктивність підготовки та видачі води споживачам та який необхідно інтегрувати в 5-ти рівневу платформу вендингової кіберфізичної системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Визначити тип, перелік та параметри обладнання, яке може працювати в складі автомату очищення води.
2. Змодельовати запити клієнтів вендингового автомату.
3. Розробити імітаційну модель (алгоритм) автомату очищення води, яка дозволить вибрати конфігурацію АОВ під запити клієнтів.
4. На основі імітаційної моделі розробити модуль аналізу даних, який дозволить генерувати рекомендовані рішення щодо заміни функціональних вузлів, а також можливої зміни конфігурації.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

На даний момент питання концепції побудови кіберфізичних систем є досить перспективним і йому присвячені багато досліджень. Так, в роботах [3, 4] в основному розглядають загальні питання побудови КФС для заводів. В [5] показано універсальну платформу, яка стала основою для побудови ВКФС. В [6]

показано, що розроблення КФС є ітераційним процесом, який складається з етапів моделювання, проектування та аналізу. Отже, одним з найважливіших етапів є моделювання, який дозволить підібрати правильну конфігурацію обладнання АОВ відповідно до запитів користувачів. Слід зазначити, що інтенсивність експлуатації АОВ буде залежати від місця розташування, що вимагає підбирати різні конфігурації обладнання для більш ефективного використання ресурсів. Таким чином, правильне виконання етапу моделювання зменшує витрати на розроблення та експлуатацію системи. Підсумовуючи сказане вище, визначимо основні вимоги до проектування АОВ: якісне очищення води; робота в складі КФС; визначити певну кількість типових конфігурацій, які будуть оптимально адаптовані до інтенсивності використання.

Для забезпечення якісного очищення, в основу АОВ покладено зворотній осмос, який є одним з найбільш популярних методів мембранного фільтрування. Мембранна технологія – найбільш поширена технологія водопідготовки, характерною особливістю якої є стабільно висока якість очищеної води (пермеат), екологічність, зручність експлуатації. Завдяки цьому мембранна фільтрація отримує все більшу популярність у побутовому та промисловому застосуванні [7, 8]. В роботах [9, 10] показано, що використовуючи метод імітаційного моделювання Монте-Карло можна забезпечити надійну роботу систем очищення води. Використання методу Монте-Карло в промисловості є досить поширеним явищем. Наприклад: американська компанія Jewel Vending Company (JVC), яка виробляє і встановлює вендингові автомати з продажу ювелірних виробів, використовує даний імітаційний метод для пошуку потрібної конфігурації обладнання під конкретну торгову точку [11]. Компанії з виробництва паперових виробів використовують даний метод для оптимізації хімічного процесу та забезпечення постійної доставки паперового товару, який відповідає стандартам яскравості [12]. Виробники сталі для автомобільних деталей використовують даний метод для підвищення рівня якості і міцності готового продукту [13].

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що в складі АОВ слід використати мембрани зворотного осмосу, які забезпечать високий рівень очищення води. Для правильного вибору конфігурації обладнання найбільш доцільно застосувати метод імітаційного моделювання Монте-Карло. Програмну модель АОВ слід реалізувати в складі аналітичної системи (4-й рівень ВКФС).

5. Методи досліджень

5.1. Загальна структура автомату очищення води

Автомат складається з трьох основних модулів (рис. 2): модуля дозування та видачі води (МДВВ), модуля підготовки води (МПВ), а також з модуля управління (МУ). Модуль підготовки води – це комплекс, який складається з низки попередніх фільтрів, що захищають мембрану від пошкоджень (сильними окисниками, наприклад хлор, та механічними домішками), напівпроникної

мембрани, а також пост фільтри та мінералізатори (при потребі). Попередні фільтри мають пористість у межах 1–5 мкм. Основна ціль полягає у продавлюванні води під високим тиском через напівпроникну мембрану з метою усунути з води розчинені речовини, органіку, колоїдні частки і бактерії. Насос створює тиск в насиченій зоні (вода+домішки), в результаті чого молекули води просочуються через напівпроникну мембрану в зону ненасиченого розчину (чиста вода). Пост фільтри та мінералізатори покращують смак води (в мийках самообслуговування ця стадія не використовується).

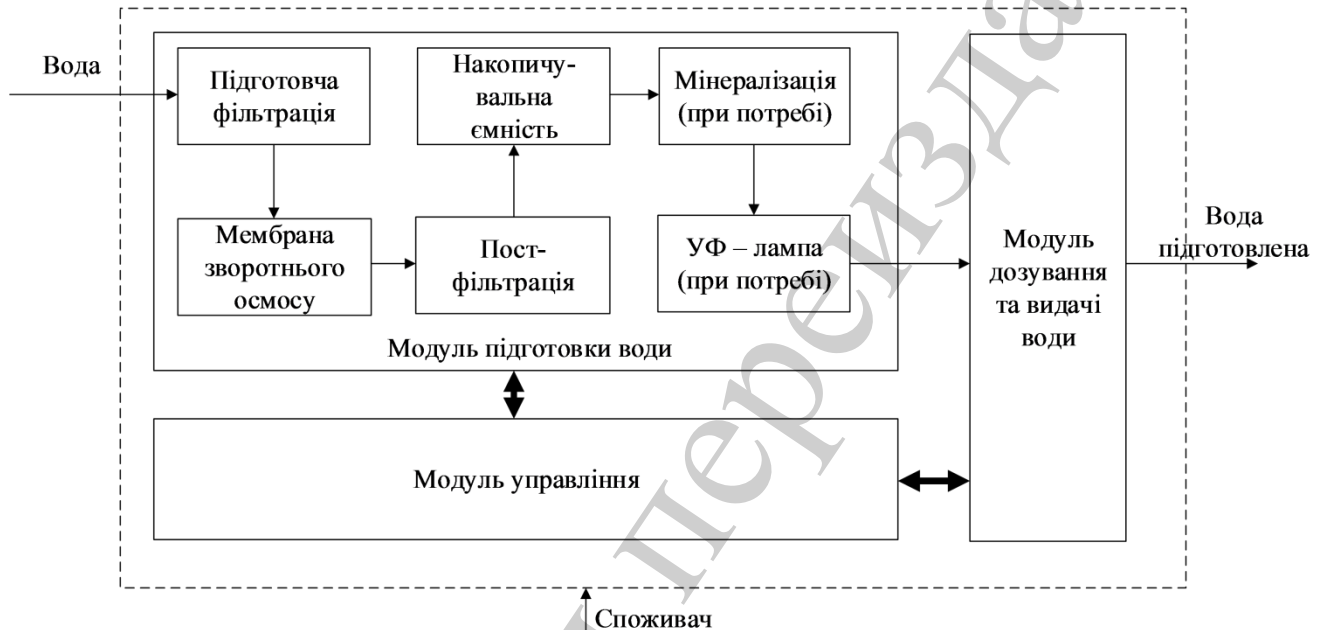


Рис. 2. Структура автомату підготовки та видачі води споживачам

В основному мембрана має низьку продуктивність і щоб компенсувати потребу в очищеній воді для користувача потрібно ставити проміжну накопичувальну ємність. Ультрафіолетова лампа знезаражує воду.

Аналіз структури на рис. 2 показав, що автомат по підготовці та видачі води має 3 основні критичні параметри (найменш продуктивні): продуктивність мембрани зворотного осмосу, об'єм накопичувальної ємності, продуктивність насоса, що здійснює видачу води.

На даний момент, дослідження показало, що продуктивності насоса видачі води 600 л/год цілком достатньо. Тому цей параметр будемо вважати незмінним. Досліджувати будемо конфігурацію обладнання з різними типами мембран і накопичувальними ємностями. Продуктивність мембрани вимірюється виходом по перміату (конверсія, гідравлічний ККД) системи:

$$a_{\text{перм}} = \frac{Q_{\text{перм}}}{Q_{\text{вих}}} = \frac{Q_{\text{перм}}}{Q_{\text{перм}} + Q_{\text{конц}}}, \quad (1)$$

де $a_{\text{перм}}$ – вихід по перміату; $Q_{\text{вих}}$, $Q_{\text{перм}}$ і $Q_{\text{конц}}$ – об’ємні потоки вихідної води, перміату та концентрату, відповідно. Продуктивність та селективність процесу зворотного осмосу залежать не тільки від самої мембрани, але і від параметрів процесу розділення. До таких параметрів відносяться: тиск, температура та солевміст вихідної води. Для моделювання будемо брати мінімальну можливу продуктивність мембрани (50 % від задекларованого потоку пермеату). Множину моделей мембран вибираємо з тих, що пропонує один з світових виробників такого обладнання – корпорації DowChemical (США) [14] (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики мембран

Тип мембрани	Потік перміату, $Q_{\text{перм}}$ (л/год)	Необхідний потік, $Q_{\text{вих}}$ (л/год)
TW30-1812-100 (з’єднання 3 шт.)	50	125
TW30-3012-500	75	150
TW30-3012-500 (з’єднання 2 шт.)	150	300
XLE4040	250	400

Накопичувальні ємності будемо вибирати серед тих, що серійно виробляються, а це 50 л, 100 л, 150 л, 200 л, 250 л, 500 л.

Отже, за результатами аналізу описуємо множину типових конфігураційних параметрів автомату очищення води:

$$P^k = \{P_1^k, P_2^k, \dots, P_n^k\},$$

де k – тип конфігурації; n – кількість конфігурацій. Кожен з елементів P_{ij}^k характеризується множиною наступних характеристик:

$$P_{ij}^k = \{Q_{mi}, V_j, Q_n\},$$

де Q_{mi} – множина мембран зворотного осмосу (табл. 1), $Q_m = \{50, 75, 150, 250\}$;

V_j – множина накопичувальних ємностей, $V = \{50, 100, 150, 200, 250, 500\}$;

Q_n – продуктивність насоса видачі води, $Q_n = 600$ л/год.

5.2. Множина вхідних змінних

На вхід АОВ подається дві змінні, а саме запити від споживачів, а також вода, яка буде очищатися. Будемо вважати, що об’єм води, який має поступати (табл. 1), завжди забезпечується. Для визначення потреби в очищеній воді були зняті

щоденні продажі (використання) очищеної води на 20 торгових точках у м. Львові (Україна) протягом двох місяців [15]. Наступним кроком було виділено групи об'єктів з подібними продажами. Для цього використовується кластерний аналіз на основі мережі Кохонена, який реалізований на мові програмування R. В результаті кластерного аналізу виділено потребу в АОВ з продуктивностями до 640 л/день та до 1000 л/день. В результаті отримуємо інтенсивність запитів клієнтів протягом дня з загальною потребою очищення до 640 л/день (рис. 3). Аналогічно сформовано вхідний потік до 1000 л/день.

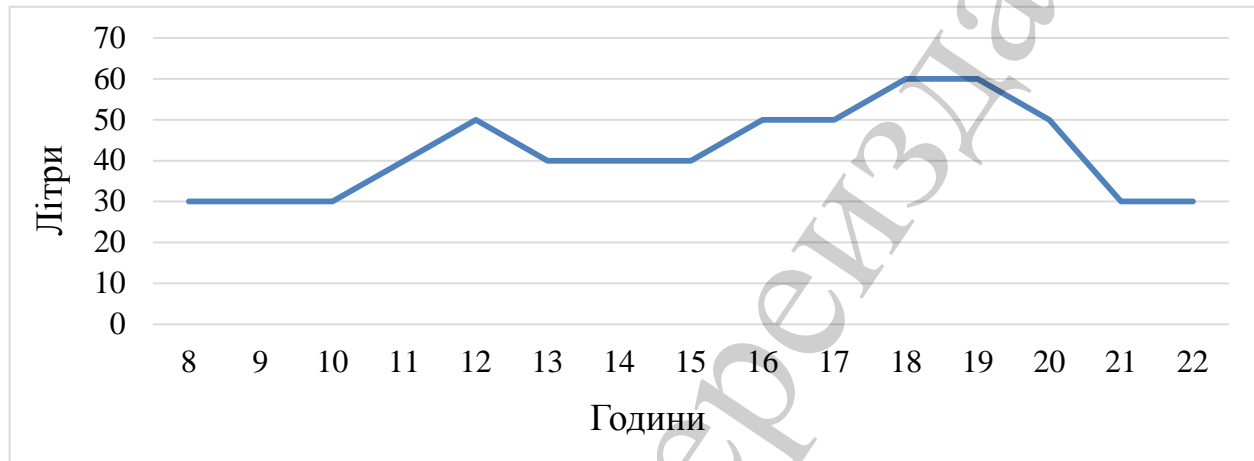


Рис. 3. Інтенсивність запитів клієнтів протягом дня (до 640 л/день)

Фактично задача генерації вхідних даних, які найбільш точно відповідають реальним є однією з найважливіших і має безпосередній вплив на точність визначення конфігурації АОВ.

5.3. Алгоритм моделювання

Алгоритм імітаційного моделювання представлений на рис. 4 граф-схемою алгоритму.

На вхід алгоритму подаються параметри P , а результатом роботи є вихідна змінна Y – кількість відмов користувачам. Опишемо основні змінні, які використовуються в алгоритмі:

V_s – залишок води в ємності;

V – об'єм ємності;

V_m – об'єм води, який система очищує за одну ітерацію;

V_{out} – об'єм води, який система видає користувачу за одну ітерацію;

C – запит від клієнта;

L_q – кількість користувачів у черзі;

$Delt$ – крок моделювання;

T – загальний час моделювання;

T_i – текучий час моделювання;

$S=1$ – ознака зайнятості АОВ.

Коротко опишемо основні етапи роботи алгоритму. Спочатку вводяться параметри P_{ij}^k моделі АОВ та проводиться ініціалізація змінних. Вважається, що на початку моделювання ємність є повною. Далі проходить основний цикл моделювання з кроком $Delt$ та загальним часом T . Опишемо перелік функцій основного циклу:

- імітація набору води в ємність;
- генерація випадковим чином запиту користувача (приклад даних показаний на рис. 4);
- перевірка стану системи;
- імітація видачі води користувачу;
- перевірка коректності виконання запиту.

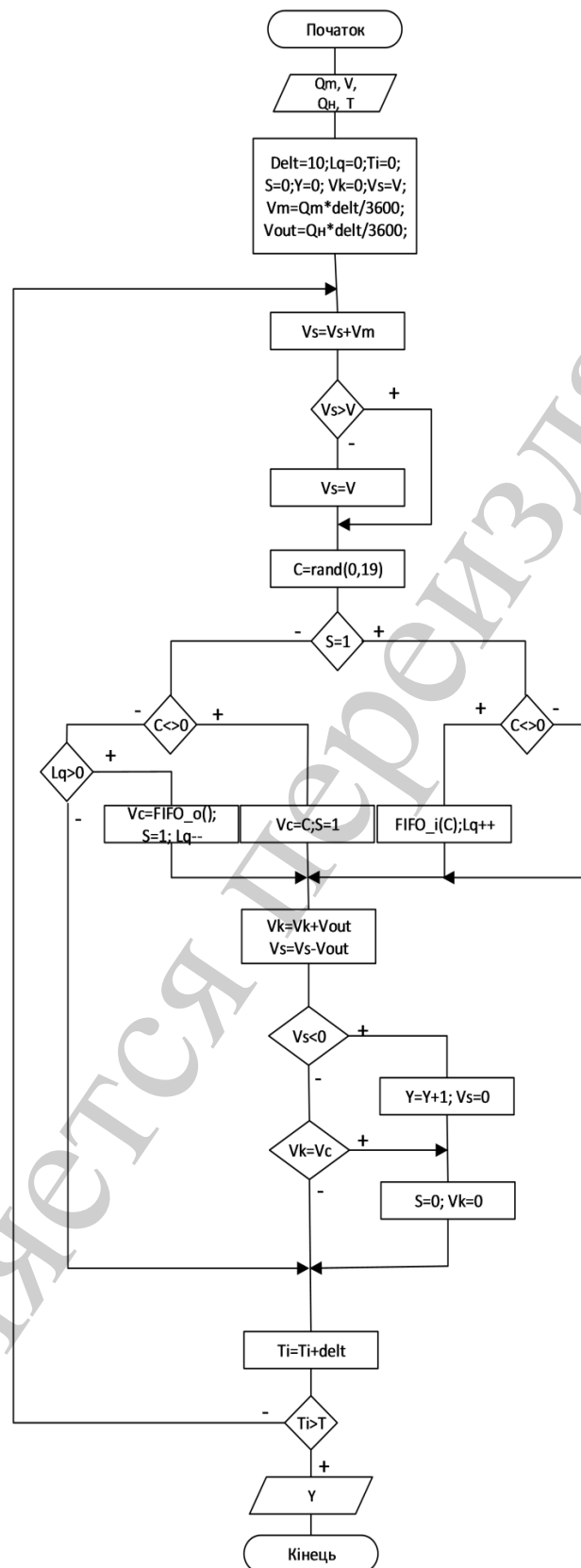


Рис. 4. Граф-схема алгоритму імітаційного моделювання роботи автомату очищення води

Якщо в певний момент система зайнята, то запит, що прийшов ставиться в чергу. Вважається, що черга має безмежний розмір.

6. Результати дослідження

Для отримання результатів досліджень алгоритм імітаційного моделювання (рис. 4) був реалізований на мові програмування R. На вхід алгоритму подаємо множину конфігурацій описаних в п. 5.1 цієї роботи, а також задаємо інтенсивність споживання очищеної води, яка описана в п. 5.2. Для прикладу покажемо результати моделювання роботи АОВ з наступною конфігурацією: тип мембрани – TW30-1812-100; бочка ємністю 250 літрів (табл. 2).

Найважливішим є «Кількість відмов», які зроблені системою впродовж процесу моделювання. Якщо це значення не нульове, значить система не справляється з такою інтенсивністю запитів, отже задана конфігурація обладнання не підходить. Як видно з табл. 2, одна і та ж система реагує по-різному, в залежності від інтенсивності запитів. В першому випадку було нуль відмов, тобто система успішно обробила всі транзакції. В другому було 24 відмови, що складає майже 20 % відсотків від загальної кількості запитів. Отже, вказана вище конфігурація здатна працювати в точках де інтенсивність споживання води до 640 л. на день.

Таблиця 2

Результати моделювання

Тип параметру	Приклад 1 (640 л/день)	Приклад 2 (1000 л./день)
Середня довжина черги	0	5
Кількість транзакцій	64	124
Кількість відмов	0	24
Процент відмов	0	19,35
Кількість виданої води	640	1000
Час моделювання	14,5	14,5

Результати моделювання всіх заданих конфігурацій представлені в табл. 3, 4. На перетині відповідного типу бочки і мембрани описується стан системи: «0» означає, що з даним потоком клієнтів автомат не впорається; «1» – зможе обробити всіх клієнтів. При обрахунках береться 50 % продуктивності мембрани.

Таблиця 3

Варіанти конфігурацій автомата для забезпечення 640 л/день

Мембрана(50%) (л/год)/Бочка (л)	50	100	150	200	250	500
60	0	0	0	0	1	1
75	0	0	1	1	1	1
120	1	1	1	1	1	1
250	1	1	1	1	1	1

Таблиця 4

Варіанти конфігурацій автомата для забезпечення 1000 л/день

Мембрана (50 %) (л/год)/Бочка (л)	50	100	150	200	250	500
60	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	1
250	1	1	1	1	1	1

Отже, оптимальною конфігурацією обладнання АОВ для обслуговування користувачів з інтенсивністю 640 л/день є паралельно працюючі три мембрани TW30-1812-100 з накопичувальною ємністю об'ємом 250 літрів. Щоб обслуговувати клієнтів з інтенсивністю 1000 л/день необхідно вибрати мембрану XLE4040 з накопичувальною ємністю об'ємом 50 літрів. Для другого випадку не вибрана конфігурація з двох TW30-3012-500 та бочки об'ємом 500 л, тому що вона не вміщається в задані габарити АОВ. В момент встановлення АОВ визначається конфігурація, яка найбільш доцільна для певного місця, якщо в процесі експлуатації аналітична система, прогножуючи поведінку користувачів, може рекомендувати змінити конфігурацію на більш продуктивну.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Експлуатація автомата очищення води в складі вендингової кіберфізичної системи дозволить зменшити витрати на його експлуатацію та інсталяцію. Забезпечить більш якісний сервіс для користувачів.

Weaknesses. Автомат очищення води потребує додаткові засоби передачі даних (3G модем), а також щомісячну оплату за Інтернет зв'язок.

Opportunities. Впровадження АОВ в мережу мийок самообслуговування дозволить зменшити витрати на сервісне обслуговування на 20–30 %.

Threats. На першому етапі впровадження системи необхідно виділити додаткові кошти на реалізацію програмно-апаратного комплексу, який буде забезпечувати функціонування 3,4 та 5 рівнів ВКФС. Також додатково необхідно залучити системних адміністраторів для обслуговування системи.

8. Висновки

1. Визначено, що основними компонентами автомата очищення води є модуль дозування та видачі води, модуль підготовки води та модуль управління. За процес очищення відповідає модуль підготовки води, який складається з наступних компонентів: блок підготовчих фільтрів, мембрани зворотнього осмосу, блок пост-фільтрів, накопичувальної ємності, мінералізатора, УФ-лампи. Критичними параметрами, які впливають на продуктивність автомата очищення

води є: продуктивність мембрани зворотного осмосу, об'єм накопичувальної ємності, продуктивність насосу, що здійснює видачу води.

2. За допомогою кластерного аналізу на базі мережі Кохонена визначено дві категорії потреб користувачів, а саме: з інтенсивністю споживання до 640 л на день та інтенсивністю споживання до 1000 л на день.

2. Розроблено імітаційну модель автомату очищення води, яка дозволила визначити дві типові конфігурації автомату на базі мембран TW30-1812-100 та XLE4040, що забезпечують продуктивність відповідно до запитів користувачів. Підбір конфігурації обладнання під точку розміщення зменшує загальні затрати на інсталяцію системи.

3. В аналітичну систему інтегровано імітаційну модель автомату очищення води, яка реалізована на мові R. Це дозволило за допомогою засобів персонального сервісу автоматизовано генерувати маршрути з переліком необхідних дій для сервісного відділу.

References

1. Salo A. M. Pryntsyp pobudovy vendinhovoi merezhi z monitorynhom // Visnyk NU «Lvivska politekhnika». Kompiuterni systemy ta merezhi. 2013. Vol. 773. P. 112–118.
2. Salo A. M. Vending cyber physical systems architecture // Advances in Cyber-Physical Systems «ACPS». 2016. Vol. 1. P. 61–65.
3. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. 2015. Vol. 3. P. 18–23. doi:[10.1016/j.mfglet.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001)
4. Kolberg D., Zuhlke D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, No. 3. P. 1870–1875. doi:[10.1016/j.ifacol.2015.06.359](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.359)
5. Melnyk A. O. Multilevel basic cyber physical system platform: proceedings // Cyber physical systems: achievements and challenges. Lviv, 2015. P. 5–15.
6. Lee E. A., Seshia S. A. Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach. MIT Press, 2017. 565 p.
7. Tekhnologii membrannogo razdeleniya v promyshlenoy vodopodgotovke / Panteleev A. A. et al. Moscow: DeLi plyus, 2012. 429 p.
8. Wimalawansa S. J. Purification of Contaminated Water with Reverse Osmosis: Effective Solution of Providing Clean Water for Human Needs in Developing Countries // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013. Vol. 3, No. 12. P. 75–89.
9. Online fault adaptive control for efficient resource management in advanced life support systems / Abdelwahed S. et al. // Habitation. 2005. Vol. 10, No. 2. P. 105–115. doi:[10.3727/154296605774791214](https://doi.org/10.3727/154296605774791214)
10. Biswas G., Mahadevan S. A hierarchical model – based approach to systems health management: proceedings // IEEE Aerospace conference. Big Sky, 2007. doi:[10.1109/aero.2007.352943](https://doi.org/10.1109/aero.2007.352943)

11. Jewel vending company. URL: <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/ECON/Simulation.ppt> (Last accessed: 01.03.2018).
12. Martz E. Making the World a Little Brighter with Monte Carlo Simulation. 2017. URL: <http://blog.minitab.com/blog/understanding-statistics/making-the-world-a-little-brighter-with-monte-carlo-simulation> (Last accessed: 05.03.2018).
13. Martz E. Making Steel Even Stronger with Monte Carlo Simulation. 2017. URL: <http://blog.minitab.com/blog/understanding-statistics/making-steel-even-stronger-with-monte-carlo-simulation> (Last accessed: 05.03.2018).
14. The Dow Chemical Company. URL: <https://www.dow.com/> (Last accessed: 01.03.2018).
15. Melnyk A., Salo A. Cyber physical system of parking lot operation: proceedings // Automatic Control and Information Technology (ICACIT'17). Cracow, 2017. P. 184–197.